

SH 波電磁超音波探触子 (EMAT)
の構造設計に関する検討

(研究報告)

2003 年 1 月

核燃料サイクル開発機構
敦賀本部 国際技術センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184

Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

SH波電磁超音波探触子(EMAT)の構造設計に関する検討 (研究報告)

徐 陽* 田川 明広* 上田 雅司* 山下 卓哉*

要 旨

「もんじゅ」原子炉容器廻りISIにおいて、高温環境での体積検査にEMATが使用されている。検査精度の向上に加え、操作性と耐久性の向上のため、検査ロボットの重量半減が要求され、それに伴い、EMAT関連部分の軽量化も研究課題になっている。

本研究報告では、SH波EMATの軽量化にあたり、一番基本である磁石構造の軽量化の可能性に関して磁束密度分布特性から解析し、Halbach磁石配置をEMAT磁石構造とする検討について報告する。

研究方法としては、SH波EMATの一般的な磁石構造とHalbach磁石配置について、数値解析で静磁場解析を行ない、各磁石構造における磁束密度分布特性を比較・検討し、より強力な磁気特性を有する磁石構造を明らかにする。なお、本報告は磁石の常温特性のみについて検討を行なった。

解析結果を以下のようにまとめた。

①Halbach磁石配置は、SH波EMATの磁石構造として使用可能である。

②Halbach磁石配置は、一般的な磁石構造より強力な磁気特性を有する。配置半周期2.5mm、縦と横方向に磁化した磁石の厚み寸法 $a=b=1.25\text{mm}$ のHalbach配置における磁石ワーキング表面法線方向の磁束密度の最大値は、一般的な磁石構造の1.6倍にも達成する。即ち、ほぼ同じ磁石の量でより強力なSH波EMATが構成できる。

③SH波EMATの磁石構造において、ワーキング表面法線方向の磁束密度は磁石高さ寸法 L への依存性が小さい。これは、隣接し合う磁石磁場の相互影響によると考えられる。配置半周期2.5mmの場合、高さ寸法5mmがあれば、磁石配置構造ではほぼ一定で安定な磁気特性が得られるが、磁石製作時のばらつきを考慮しても、高さ7mmで十分な特性が得られる。これは、磁石の重量軽減によるEMATの軽量化にとって重要な意義を持つ。

④磁石構造の配置半周期が大きければ、構造全体の耐リフトオフ特性も良くなる。ただし、SH波EMATの磁石構造とする場合、低周波数で使用することになるので、適切な配置半周期と耐リフトオフ特性のバランスの取れた設計が重要である。

一方、EMATの高温使用における磁石構造の設計とパラメータの最適化が必要と考えられる。これについては別途に報告する。

Structure design on SH wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT)

YANG XU* AKIHIRO TAGAWA* MASASHI UEDA* TAKUYA YAMASHITA*

Abstract

EMAT is being used for the volume inspection under high temperature environment in the neighborhood ISI (In Service Inspection) of MONJU reactor vessel. In order to improve the operability and durability of ISI instruments, the weight halving of the inspection robot is required. In this connection, it becomes necessary and important to lighten some related assemblies of EMAT.

In the present research, along with the light weightization of SH wave EMAT, the feasibility to reduce the weight of general magnet structure in accordance with the characterization of magnetic flux density distributions is analyzed. In addition, it is found that the Halbach magnet arrangement can be used as a magnet structure of SH wave EMAT.

Numerical simulation of a static magnetic field analysis is employed for characterizing the magnetic properties of the general magnet structure of SH wave EMAT, and the Halbach magnet arrangement. The magnetic flux density distributions in both structures are compared with each other to search for a more powerful magnet structure.

It is noticed that the magnetic properties of magnet structure are analyzed only at room temperature in this report.

The main analysis results are summarized as follows:

1. Halbach magnet arrangement can be used as a magnet structure of SH wave EMAT.

2. Halbach magnet arrangement has a more powerful magnetic flux density distribution than that for the general magnet structure. In the case of a magnet arrangement with 2.5 mm half-period, the maximum value of magnetic flux density along the normal direction in the Halbach magnet arrangement (magnet thickness $a=b=1.25$ mm) can be as large as 1.6 times of that in the general magnet structure.

In other words, by using Halbach magnet arrangement, a powerful SH wave EMAT can be composed comparing with the general magnet structure, even if nearly the same amount of magnet is used.

3. The dependence of the magnetic flux density along the normal direction on the magnet height dimension L is weak in the magnet structure of SH wave EMAT. This is considered to be due to the interaction between the magnetic fields of the adjoining magnets. In the case of the arrangement half-period being 2.5 mm, a dimension of 5 mm in height is found large enough to yield nearly the strongest magnetic flux density distribution. Nevertheless, it is better to use the magnet structure with 7 mm height dimension if the dispersion variation of magnetic property during the production process is taken into account. This result is of significance. It implies that, to reduce the weight of EMAT, one is only need to decrease the height dimension of magnet to an appropriate size.

4. The larger arrangement half-period gives rise to a better liftoff performance. However, it is usually difficult to balance between an appropriate arrangement half-period and a good liftoff performance. Because a magnet structure with large arrangement half-period should have a good liftoff performance but it has to work in lower frequency range, results in a worse detection resolution.

It should be emphasized that the work to design the magnet structure of SH wave EMAT for use at elevated temperature has to be undertaken and the optimization of the parameters of EMAT is necessary. This will be addressed in detail later.

* ISI system development group, International Cooperation and Technology Development Center, JNC

目 次

1. 背 景.....	6
2. 目的と研究方法.....	6
3. 解析に用いる磁石構造.....	6
3.1. SH 波 EMAT の一般的な磁石構造.....	6
3.2. Halbach 磁石配置.....	2
4. 静磁場解析の基礎理論.....	3
5. 常温における磁束密度分布の解析結果及び考察.....	4
5.1. 単体磁石における磁束密度分布特性.....	4
5.1.1. 磁石構造と解析座標系.....	4
5.1.2. 解析結果と考察.....	4
5.2. SH 波 EMAT の一般的な磁石構造の磁気特性.....	6
5.2.1. 磁石構造と解析座標系.....	6
5.2.2. 解析結果と考察.....	7
5.3. SH 波 EMAT の Halbach 磁石配置の磁気特性.....	9
5.3.1. 磁石構造と解析座標系.....	9
5.3.2. 解析結果と考察.....	9
5.4. 磁石構造常温特性総括.....	21
6. まとめ.....	22
7. 参考文献.....	23

図(Fig.)目次

Fig. 1 SH波 EMAT の一般的な磁石構造.	2
Fig. 2 SH波 EMAT の原理図.	2
Fig. 3 Halbach 磁石配置.	3
Fig. 4 解析で用いた磁石単体の形状および磁束密度の評価断面位置. (a) と (b) は解析磁石単体の形状と寸法, (c) 解析座標系における磁束密度の評価位置.	4
Fig. 5 単体磁石における y 方向磁束密度 B_y の分布特性 ($a=2.5\text{mm}$ and $L=7\text{mm}$).	5
Fig. 6 単体磁石の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 磁石厚みは $a=2.5\text{mm}$ 、高さ L はそれぞれ (a) 10mm , (b) 7mm , (c) 5mm , (d) 3mm である。図に示した数値は磁石表面からのリフトオフ距離である.	5
Fig. 7 磁石厚み寸法は $a=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ 3mm 、 5mm 、 7mm 、 10mm の単体磁石の縦中心断面における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性.	6
Fig. 8 SH波 EMAT の一般的な磁石構造における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. (a) B_y 分布のカラーイメージ, (b) B_y のコンター分布と B の方向性分布特性.	7
Fig. 9 SH波 EMAT の一般的な磁石構造の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ (a) 10mm (b) 7mm (c) 5mm と (d) 3mm である.	8
Fig. 10 SH波 EMAT の一般的な磁石構造のセントラル断面における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ 10mm 、 7mm 、 5mm と 3mm である.	8
Fig. 11 Halbach 磁石配置における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. (a) B_y 分布のカラーイメージ, (b) B_y のコンター分布と B の方向性分布特性.	10
Fig. 12 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=b=1.25\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ (a) 5mm 、(b) 7mm と (c) 10mm である.	11
Fig. 13 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=0.625\text{mm}$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=b=1.25\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ 5mm 、 7mm 、 10mm である.	11

Fig. 14 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm、厚み寸法は $a+b=2.5\text{mm}$ である. (a) から (i) までは異なる a 、 b 組合せによる磁束密度分布の変化特性である.	14
Fig. 15 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=a/2$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm、厚み寸法は $a+b=2.5\text{mm}$ である。図に示した曲線はそれぞれ a と b の組合せを変化した場合の磁束密度変化特性である.	14
Fig. 16 Fig. 15 の拡大分布.	15
Fig. 17 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm、厚み寸法 $a=b$ はそれぞれ (a) 1.0mm, (b) 1.25mm and (c) 1.5mm である.	17
Fig. 18 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=a/2$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm、厚み寸法 $a=b$ はそれぞれ 1.0mm, 1.25mm と 1.5mm である.	17
Fig. 19 ヨークを用いた Halbach 磁石配置.	18
Fig. 20 ヨークを用いた Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性.	18
Fig. 21 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=a/2$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 比較する構造はそれぞれ Halbach 磁石配置とヨークを用いた Halbach 磁石配置、使用する単体磁石の高さ寸法 L は 5mm、厚み寸法は $a=b=1.25\text{mm}$ である.	19
Fig. 22 楕形状磁石を用いた Halbach 磁石配置.	19
Fig. 23 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の高さ寸法は $L=7\text{mm}$ 、厚み寸法は $a=1.0\text{mm}$ と $b=1.5\text{mm}$ 、磁石配置周期数はそれぞれ (a) 2, (b) 4, (c) 6, (d) 7.5 と (e) 8 である.	20
Fig. 24 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=0.5\text{mm}$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 比較する構造は Halbach 磁石配置で、用いた単体磁石の高さ寸法は $L=7\text{mm}$ 、厚み寸法は $a=1.0\text{mm}$ と $b=1.5\text{mm}$ 、使用する磁石配置周期数はそれぞれ 2、4、6、7.5 と 8 である.	21

1. 背景

高速増殖炉「もんじゅ」の供用期間中検査(In Service Inspection: ISI)において、原子炉容器及び入口配管では、高温(200℃)・高放射線(1000R/h)・狭隘空間(約 300mm)という厳しい環境条件下での実施が要求され、非接触非破壊検査手法として、電磁超音波探触子(Electromagnetic Acoustic Transducer: EMAT)の使用が考えられる¹⁾。

上記被検体はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 製の寸法鍛造体である。実際の検査対象とされる欠陥は溶接線及びその熱影響部近傍の亀裂と想定され、溶接の融解・過熱・急速冷却履歴による溶接金属組織の不均質・結晶異方性及び熱影響部結晶粒の成長も予想され、全体的に粗大結晶粒構造であることが知られている。

一般的に、バルク縦波や横波は材料内部に伝播する際、結晶粒界で超音波散乱が発生し、また、粒界両側の音響インピーダンスの差異により、斜め入射超音波の屈折現象が発生し、超音波伝播方向が変化する。これに対し、粒子振動方向が材料境界面と平行する横波(Horizontally Polarized Shear Wave or Shear Horizontal Wave: SH 波)は上記現象に影響され難く、粗大粒構造や溶接部のような結晶異方性の大きい被検体にも適応できる^{2,3)}。今までに SH 波を用いた EMAT の研究開発が多数報告され⁴⁻⁸⁾、三菱重工により開発された「もんじゅ」ISI 向けの SH 波 EMAT⁹⁾は、板厚 100mm までの SUS304 ステンレス鋼への適用可能性が示された。

一方、「もんじゅ」ISI において、操作性と耐久性の向上のため、次世代検査機の軽量化(重量半減)が要求され、軽量化されても同等な探傷性能を有する新しい EMAT の開発が課題になっている。

このような背景において、新型軽量化 EMAT センサーの開発に当たり、センサーの基本性能を決める永久磁石構造の選定及びその性能確認が最も基本的かつ優先的に検討すべき課題と考えられる。本研究ではこの基本課題の一つである SH 波 EMAT の永久磁石の構造及び磁気特性について、磁束密度分布特性の観点から検討を進める。

2. 目的と研究方法

本研究の目的は、SH 波 EMAT センサーの軽量化に適する永久磁石構造を明確にすることである。

SH 波 EMAT の一般的な磁石構造と新型磁石配置について、数値解析で静磁場解析を行ない、各磁石構造における磁束密度分布特性を比較・検討し、より強力な磁気特性を有する磁石構造を明らかにする。

3. 解析に用いる磁石構造

3.1. SH 波 EMAT の一般的な磁石構造

通常使われている SH 波 EMAT の磁石構造は 30 年前¹⁰⁻¹²⁾に提案されてから、現在まで殆ど構成を変えずに使用され続けてきた。その基本構造は Fig. 1 に示したように、隣接する角柱状磁石を N、S 極で交互に逆向きに対向配置させることにより構成され、PPMs (Periodic Permanent Magnets) 構造とも呼ばれる。Fig. 1 において、矢印の方向は磁石の S 極から N 極への向きを示す。この構造の拡張版として、隣接する磁石の間に非磁性体スペーサーを入れる形式で、近隣磁石の境界付近の渦電流損失を低減させるため⁴⁾の構造もある。

このような磁石構造では、Fig. 2 に示したような励磁コイルに高周波電流を流すと、導電体である被検体表面近傍において電磁誘導により渦電流が励起され、磁石の静磁場で生成された磁石表面法線方向の磁束密度 B_y との相互作用により、同周波数を有する周期的なローレンツ力が発生し、結晶格子に伝わり、各位置における粒子振動の相互干渉の結果、被検体表面と θ 角(式(1)を参照)をなす斜め方向に超音波が送信される。これは SH 波 EMAT の基本原理である。受信原理はこの逆である。

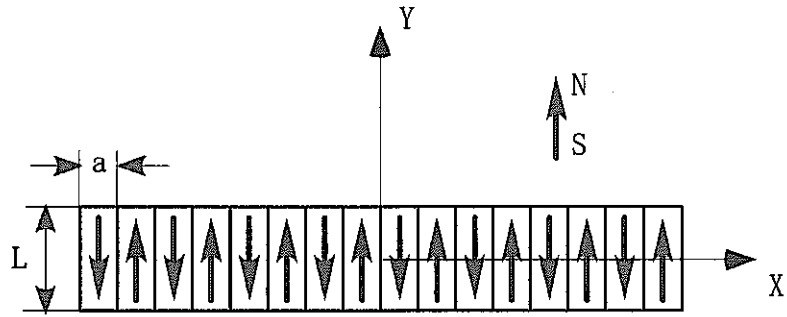


Fig. 1 SH波 EMAT の一般的な磁石構造.

$$\sin \theta = \frac{V_{SH}}{2af} \quad (1)$$

ただし、 a は Fig. 1 に示した単体磁石の厚み、 V_{SH} は被検体の SH 波音速、 f は超音波周波数である。

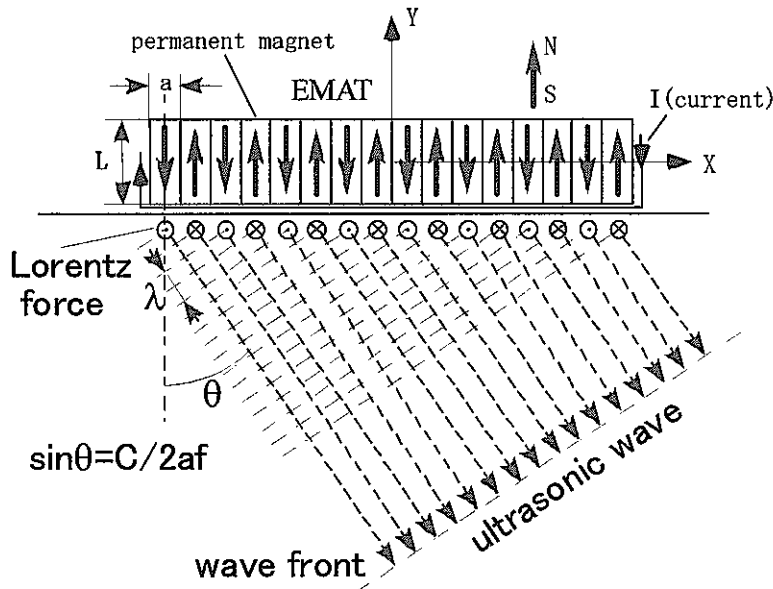


Fig. 2 SH波 EMAT の原理図.

一般的に、EMAT は一定温度で使用されるので、被検体の音速 V_{SH} が定数と考えることができる。式(1)により、残りの3つパラメータの中の独立変数が2つまでに絞られる。斜角超音波探傷において、入射角 θ の可能範囲は材料の減衰特性、被検体構造、検査欠陥予想性状などによりかなり制限され、事実上半固定パラメータとなり、残りの自由度は、 a と f のバランスの取り方の問題になる。超音波分解能を向上させるためには、周波数 f を高め設定するほうが望ましい。しかし、そのためには、磁石厚み a が小さい値を取る必要があり、構造全体の磁気特性が低下し、さらに永久磁石製作時のばらつきの影響が大きくなり、しかも、EMAT 永久磁石部分の組立が困難になる問題が起こり得る。従って、入射角 θ と検査周波数 f を適当な範囲に設定し、さらに寸法 a の影響をはっきり把握することにより永久磁石構造を最適化することが考えられる。実際の製作する際、解析結果を参照した上、数種類寸法の磁石構造を選択し、最適構造を決めることになる。

3.2. Halbach 磁石配置

Fig. 2 に示した SH 波 EMAT の一般的な磁石配置構造から分かるように、励起された超音波周波数 f は磁石厚み(配置半周期) a の関数である。永久磁石の N 極と S 極の厚み中心に対向する被検体表面近傍の y 方向磁束密度は、ローレンツ力の励起強さ、従って、励起超音波強度への影響が最も大きい、磁石構造の性能を表

す一つの参照指標とも考えられる。言い換えれば、磁石構造のワーキング面で如何に大きな磁束密度を生成させることが、高性能磁石構造を構成する要となる。このような磁石構造が構成できれば、送信探触子の場合、より強力な超音波が励起でき、受信探触子の場合、より SN 比の高い受信信号が得られる。

つまり、磁石配置の工夫による磁束密度の向上が考えられる。Fig. 3 に示したのは、Halbach¹³により提案された加速器分野でウイグラーやアンジュレーターの挿入光源用磁気回路として知られている磁石配置である。

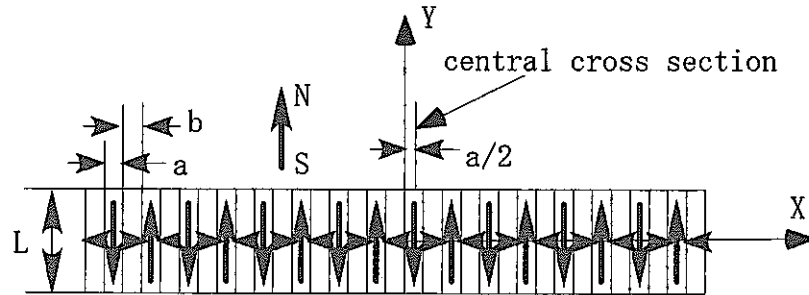


Fig. 3 Halbach 磁石配置.

ただし、 a 、 b はそれぞれ縦方向と横方向に磁化した単体磁石の厚み、 L は単体磁石の高さである。

後述するように、Halbach 磁石配置は SH 波 EMAT に適用できる。この磁石配置は、一般的な磁石構造の拡張版のスペーサーを横方向に磁化した扁平状磁石を交互に反対向きに挿入し入れ替えることにより構成される。この構造で磁束密度が向上する理由は、横方向に磁化した磁石の挿入により、磁束線が簡単に隣接する磁石まで戻れず、より遠回りしてから戻ることにより、 y 方向磁束密度を高くさせるものと理解される。注意すべきは、縦方向に磁化した磁石の間に、横方向に磁化した磁石を入れる順番が変わると Halbach 構造が変わらないが、構造全体の表面磁気特性は上下反転になる。つまり、Halbach 磁石配置で得られた磁束密度分布は、構造の上下部分において非対称である。従って、探触子組立の際、被検体に対向する磁気構造の面に磁束密度が大きいほうを取る必要がある。Fig. 3 においては、 y 軸の+方向に位置する磁石表面がワーキング表面になる。

以上、定性的に一般的な磁石構造と Halbach 磁石配置の特性を分析したが、下記において、各磁石配置の磁気特性を静磁場解析で定量評価を行なう。

4. 静磁場解析の基礎理論

静磁界しかも電流が流れない問題において、支配方程式のアンペアの法則

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

と磁束密度の保存則

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

の前者は、 $\mathbf{J} = 0$ と $\mathbf{D} = 0$ が成立することにより、

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

に退化する。ただし、 \mathbf{H} は磁界の強さ、 \mathbf{J} は電流密度、 \mathbf{D} は電束密度、 \mathbf{B} は磁束密度である。

ここで、磁気スカラーポテンシャル V_m を導入すると、次式が成立する。

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \quad (5)$$

なお、一般材料(強磁性体材料を含める)の構成方程式

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (6)$$

は、永久磁石などの硬質磁性材料の場合、残留磁束密度 B_r を生成する残留磁化 M_0 の項が存在し、

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_0 \quad (7)$$

の形になる。ただし、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_r は比透磁率であり、積 $\mu_0 \mu_r$ は透磁率である。

(5) 式を (7) に代入し、さらに (3) に代入すると、次式が得られる。

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}_0) = 0 \quad (8)$$

永久磁石の磁束密度分布特性はこれらの微分方程式を解くことにより求められる。

5. 常温における磁束密度分布の解析結果及び考察

「もんじゅ」ISI における非破壊検査は高温で行われるため、検査用 EMAT の高温磁気特性を把握する必要があるが、そのためには、同磁石構造の常温特性を把握しておく必要がある。本研究報告は、EMAT の磁石構造の常温磁気特性のみについて検討を行ない、高温磁気特性については別の研究報告で論ずる。

SH 波 EMAT の磁石構造の磁気特性を理解するため、単体磁石の磁気特性を把握しなければならない。

5.1. 単体磁石における磁束密度分布特性

解析対象の単体磁石は角柱状磁石と想定し、紙面垂直方向に無限(実際の有限寸法の場合、辺縁部分を除いた部分が近似的に同様な結果が得られると考えられる)と仮定して、微分方程式に基づく有限要素解析コード FEMLAB を用い、2D 解析を行なった。

5.1.1. 磁石構造と解析座標系

Fig. 4 に単体永久磁石の寸法、磁気特性解析用の座標系と評価断面位置を示した。SH 波 EMAT の超音波送受信性能への影響は、渦電流励起強度に関わる磁化方向 (y 方向) 磁束密度 B_y だけであるので、磁石単体の場合でも、 B_y に関する解析のみを行なった。

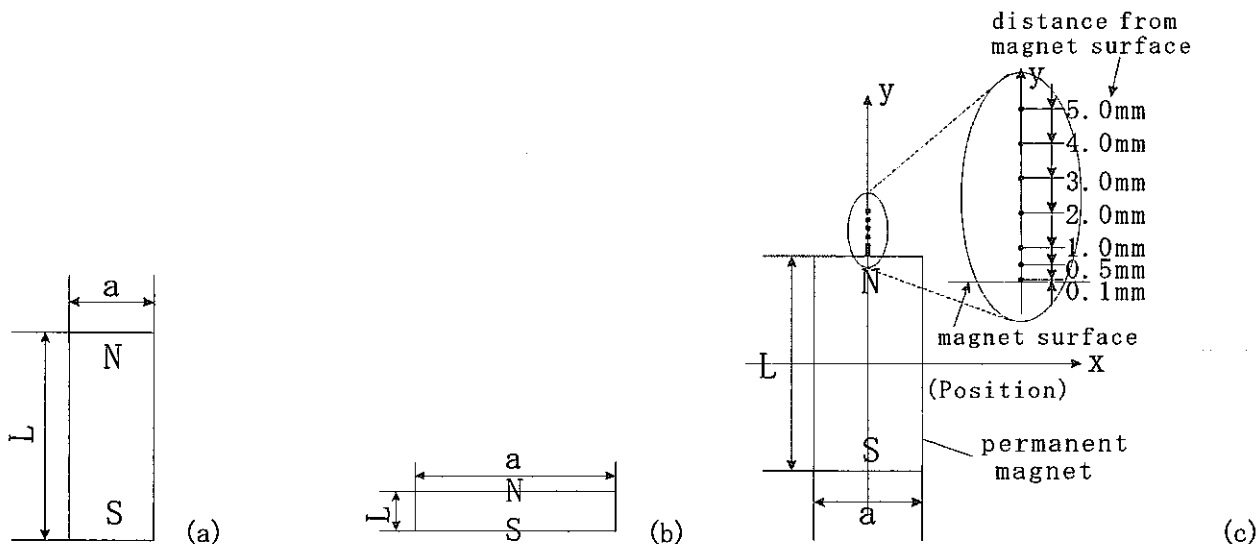


Fig. 4 解析で用いた磁石単体の形状および磁束密度の評価断面位置。(a) と (b) は解析磁石単体の形状と寸法、(c) 解析座標系における磁束密度の評価位置。

5.1.2. 解析結果と考察

解析条件：磁石材料：サマリウム・コバルト系磁石 R32H(信越化学工業株式会社)

残留磁束密度： $B_r = 1.12\text{T}$

磁石寸法：厚み方向 $a = 2.5\text{mm}$ 、高さ方向 $L = 3, 5, 7, 10\text{mm}$

Fig. 5-7 は磁束密度分布特性の解析結果である。

①. y 方向磁束密度分布 (L=7mm)

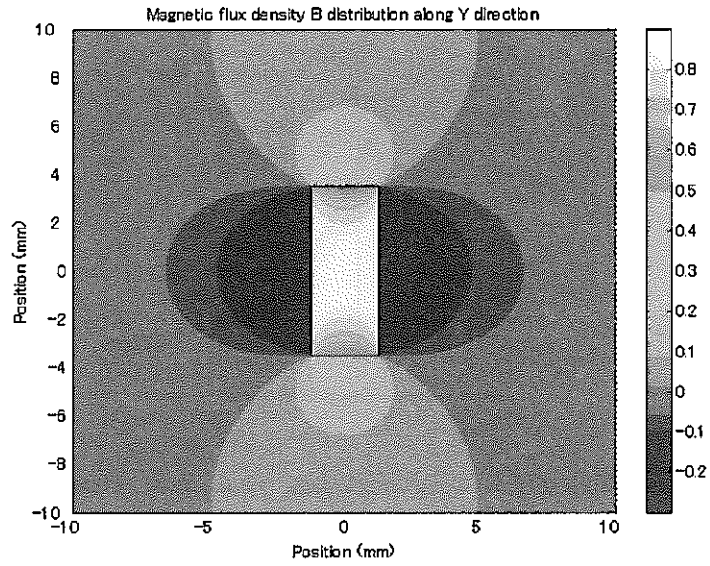


Fig. 5 単体磁石における y 方向磁束密度 B_y の分布特性 ($a=2.5\text{mm}$ and $L=7\text{mm}$).

②. y 方向磁束密度のリフトオフ依存性 (position=0 は磁石の厚み中心)

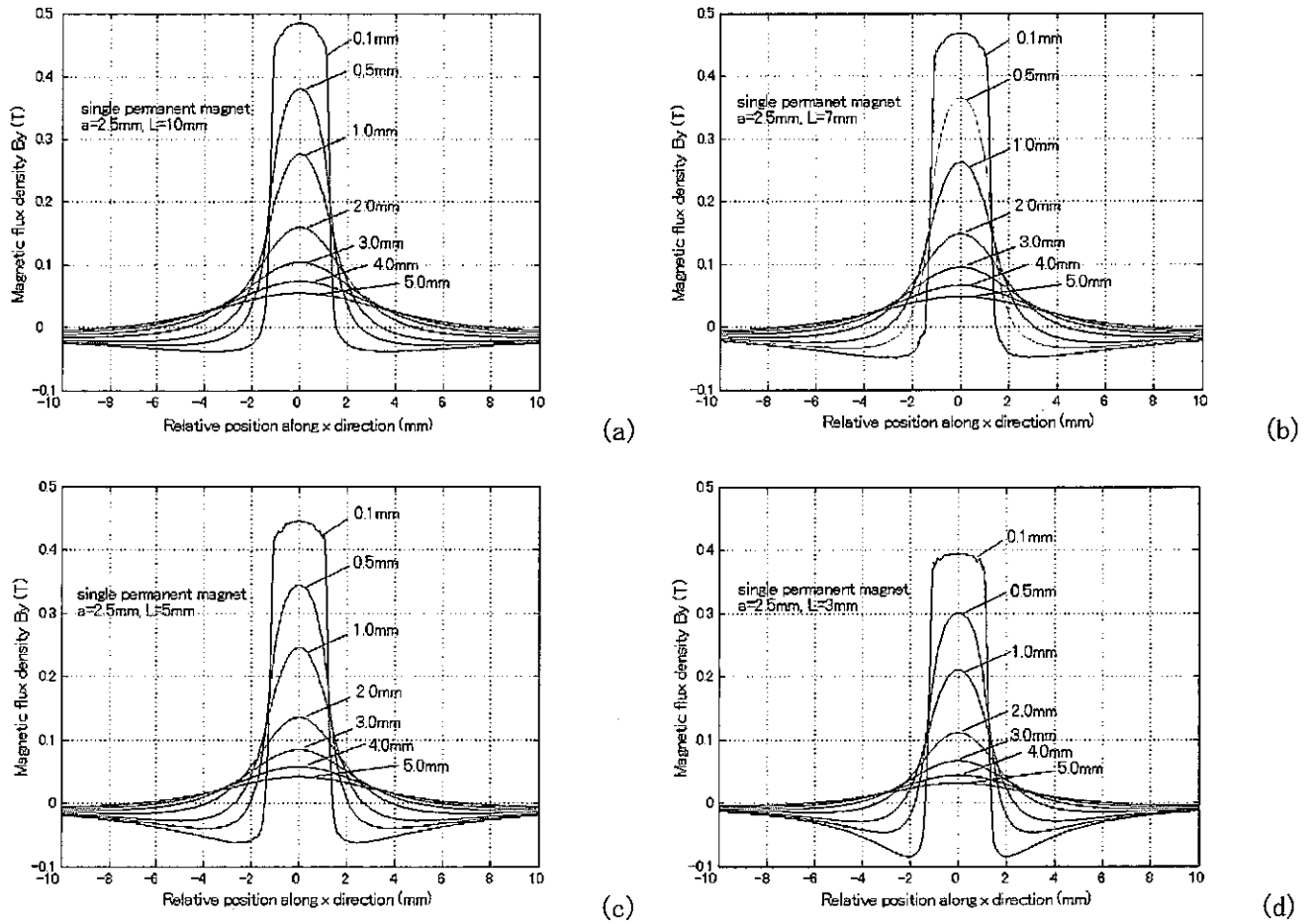


Fig. 6 単体磁石の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 磁石厚みは $a=2.5\text{mm}$ 、高さ L はそれぞれ (a) 10mm 、(b) 7mm 、(c) 5mm 、(d) 3mm である。図に示した数値は磁石表面からのリフト

③. 厚み中心断面における y 方向磁束密度変化特性 (position=0 は磁石表面、position<0 は磁石内部)

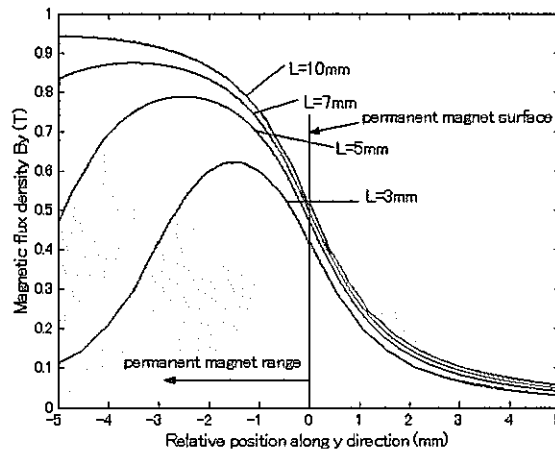


Fig. 7 磁石厚み寸法は $a=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ 3mm 、 5mm 、 7mm 、 10mm の単体磁石の縦中心断面における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性。

Fig. 5 は磁石単体 ($a=2.5\text{mm}$ 、 $L=7\text{mm}$) の y 方向磁束密度 B_y 分布のカラーイメージである。色の境界線は B_y 値の等高線である。Fig. 5 の分布を異なる断面で観察すると、Fig. 6 と Fig. 7 になる。Fig. 6 は、磁石寸法 $a=2.5\text{mm}$ 、 $L=3, 5, 7, 10\text{mm}$ の四種類の単体磁石の磁極表面からリフトオフ距離 $0.1\sim 5.0\text{mm}$ までの B_y 分布である。図から分かるように、磁石表面近傍において横方向における B_y の広がり磁石の厚み程度で、リフトオフ距離の増加につれ、 B_y の最大値が減少すると同時に横方向の広がりが増大する。リフトオフ距離 0.1mm における最大 B_y 値は、 $L=7\text{mm}$ の場合 0.47T 程度である。同じリフトオフ距離において、磁束密度は磁石の高さ寸法 L の単調増加関数である。これは磁石中心断面における B_y の分布 (Fig. 7) でより明瞭となる。つまり、磁石の高さ L が大きいほど磁束密度 B_y が大きい。言い換えれば、単体磁石の場合、磁石の磁化方向の寸法が高い (長い) ほど磁束密度の最大値も大きい。強力な磁気特性が要求される場合、高さ L の大きい磁石を選択すべきである。これは通常予測できる結果と一致している。

なお、Fig. 7 に示したように、磁石内部での磁束密度も高さ L の減少に伴い小さくなる。これは磁石内部の反磁場の影響によると考えられる。一般的にこの反磁場の影響は温度が高いほど大きくなり、磁石高温減磁の一つの原因とされている。

④. まとめ

単体磁石の y 方向磁束密度は、磁石の高さ (磁化方向) 寸法 L に敏感に依存し、 L が大きいほど、磁束密度が大きい。空間における y 方向の最大磁束密度は残留磁束密度の半分以下のレベルである。

5.2. SH 波 EMAT の一般的な磁石構造の磁気特性

磁石単体の磁気特性を把握することにより、多数磁石の配列構造の磁気特性が理解しやすくなる。

5.2.1. 磁石構造と解析座標系

SH波EMATの一般的な磁石構造は、Fig. 1に示したように磁化方向が相互に反対向きに並べる単体磁石により構成される。磁石数量を変化することにより、EMATの寸法が変化し、送信強度もしくは受信検出性能も変化する。磁石個数が増えるほど、送信EMATから励起した超音波の平面性がよくなり、指向性も鋭くなるが、近距離音場が大きくなり、近距離音場における欠陥検出性が必ずしもよくなるとは限らず、むしろ悪くなる可能性が大きい。EMATの設計において、磁石個数が最も重要なパラメータの一つであるが、本研究報告では、

主に磁石配置による磁束密度特性の変化について検討・考察し、磁石数量変化によるEMAT性能に及ぼす影響については言及しない。

5.2.2. 解析結果と考察

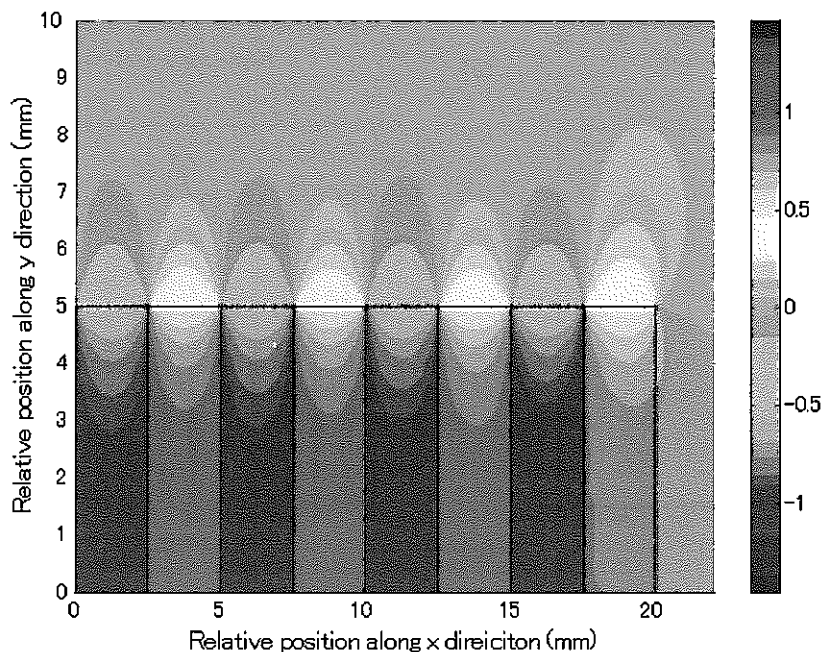
解析条件：磁石材料：サマリウム・コバルト系磁石 R22SH(信越化学工業株式会社)

残留磁束密度： $B_r=0.94\text{T}$

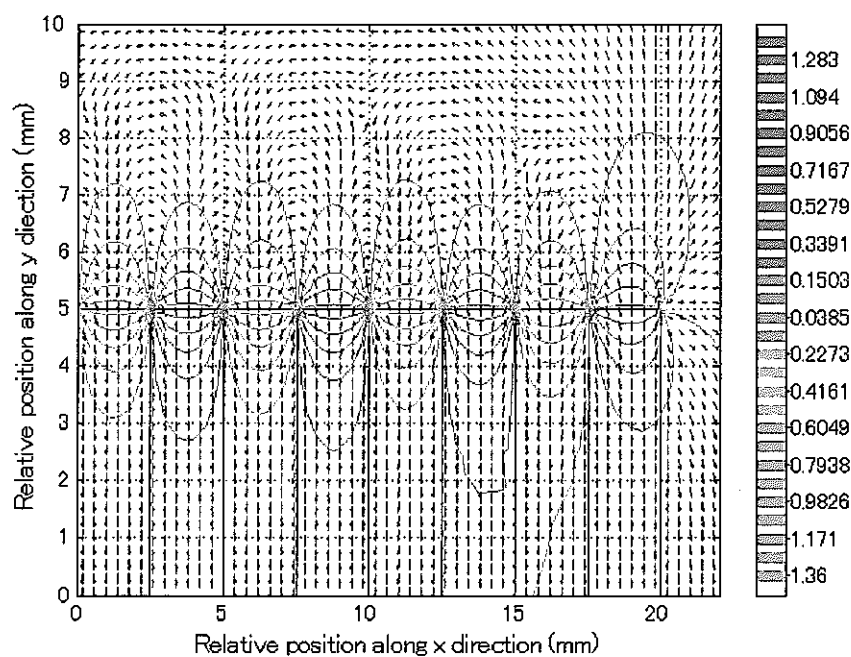
磁石寸法：厚み方向 $a=2.5\text{mm}$ 、高さ方向 $L=3, 5, 7, 10\text{mm}$ 、磁石数量 16 個

解析は対称性を利用し、1/4 部分について行ない、Fig. 8-Fig. 10 は磁束密度分布特性の解析結果である。

①. y 方向磁束密度分布：コンター・方向分布 ($L=10\text{mm}$)



(a)



(b)

Fig. 8 SH 波 EMAT の一般的な磁石構造における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. (a) B_y 分布のカラーイメージ, (b) B_y のコンター分布と B の方向性分布特性.

②. y 方向磁束密度絶対値のリフトオフ距離の依存性と高さ寸法 L 依存性

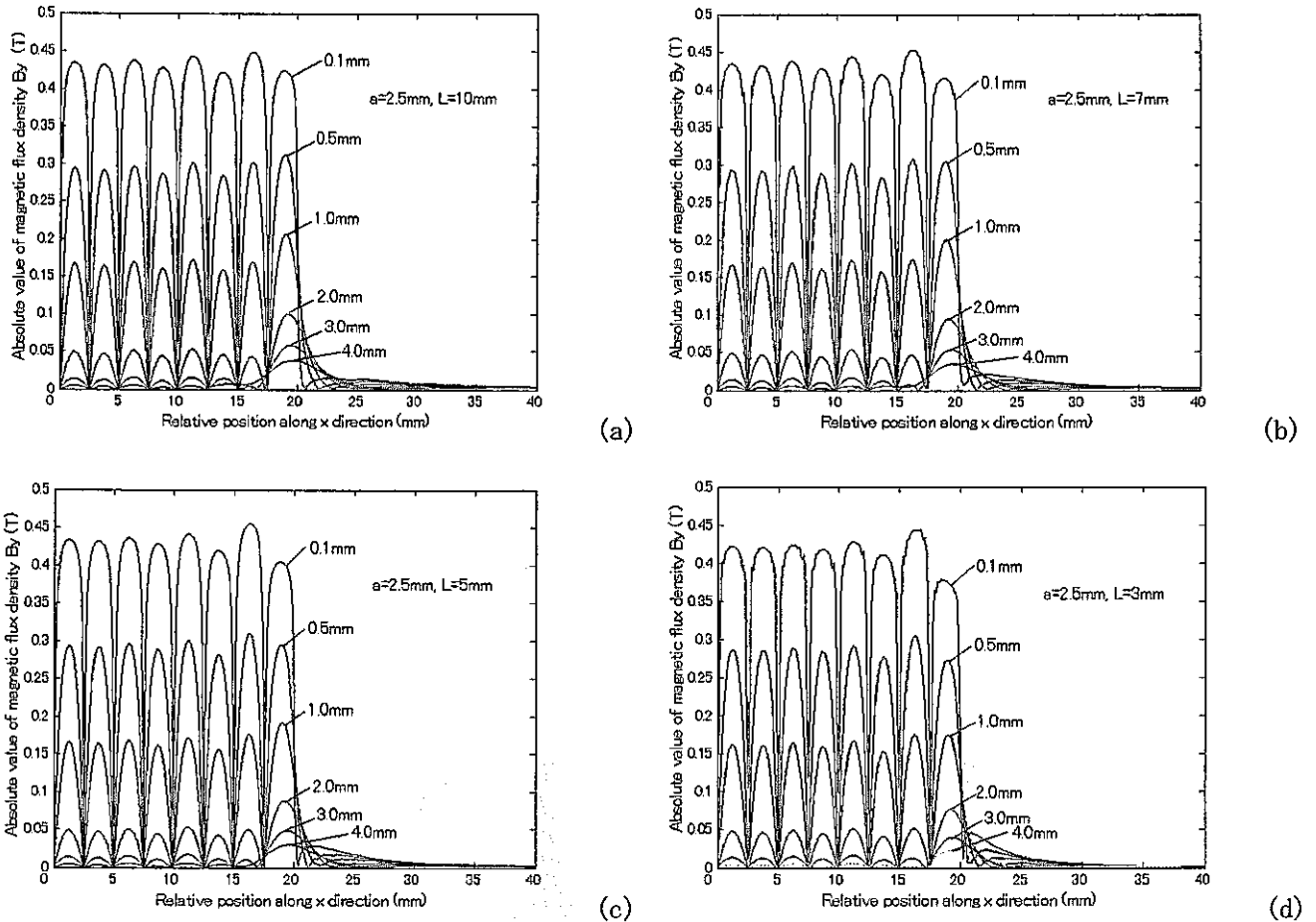


Fig. 9 SH波 EMAT の一般的な磁石構造の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ (a) 10mm (b) 7mm (c) 5mm と (d) 3mm である.

③. $x=1.25\text{mm}$ 断面における y 方向磁束密度変化特性 (position=0 は磁石表面、position<0 は磁石内部)

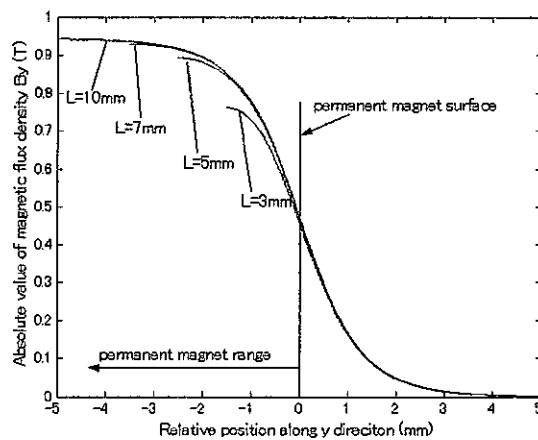


Fig. 10 SH波 EMAT の一般的な磁石構造のセントラル断面における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ 10mm 、 7mm 、 5mm と 3mm である.

Fig. 8に、 $a=2.5\text{mm}$ 、 $L=10\text{mm}$ 、単体磁石数量16個のSH波EMATの一般的な磁石構造の y 方向磁束密度 B_y 分布のカラーイメージを示した。Fig. 8(b)の B_y コンター分布は同図(a)のカラー分布を参照するとより明瞭になる。

また(b)に示した方向分布から各磁石中心部において磁束密度はほぼy方向に揃っていることが分かる。

Fig. 8のカラーイメージを、異なるリフトオフ距離の断面分布で表すと、Fig. 9(a)になる。比較のため、同図のFig. 9(b)、(c)、(d)に高さLがそれぞれ7、5、3mmの場合の磁束密度 B_y 分布も示した。各磁石単体範囲の磁束密度分布は単体磁石の分布と相似しているが、隣接する磁石の磁場の影響により、リフトオフ距離が増大しても磁束密度 B_y 分布がx方向に広がらない。一方、Fig. 9とFig. 6とを比べると、リフトオフ距離の変化に伴い、 B_y が減少する特性は単体磁石の場合と変わらないが、磁石中心断面のy方向における磁束密度 B_y 分布はFig. 10に示したように、磁石単体と大きく変化したことが分かった。即ち、磁石の高さ(磁化方向)寸法Lが3mmから10mmまで大きく増大しても、y方向磁束密度はほとんど変化しない(L=3mmの場合、多少小さい)。これは、多数の磁石の相互影響により、x方向の磁束密度変化が抑えられ、y方向に磁束密度が揃うのが原因だと考えられる。従って、多数磁石配置の場合、磁石磁化方向の寸法は重要でなく、磁石製作上、性能のばらつきの許す範囲内であれば、高さ寸法の短い磁石でも束にすると強力な磁気特性を発揮できることが分かった。

この結果は、磁束密度を低下させない状態で磁石全体の高さ寸法(体積)を減少することができ、EMATを小型軽量化できることを示唆している。

④. まとめ

SH波EMATの一般的な磁石構造は、単体磁石より高さ寸法Lがy方向磁束密度分布へ与える影響は小さい。これは、x方向磁束密度の変化が拘束され、y方向に寄与したのが原因である。この結果の大きい意義は、高さ寸法の短い磁石を使用しても、長い寸法の磁石と同様な磁気特性が得られ、EMATを軽量化できることを意味する。行われたL=3~10mmの解析範囲において、高さ寸法L=5mmの磁石構造で十分な磁束密度が得られる。なお、製作上磁石性能のばらつきとEMAT実作の難易を考慮すると、多少大きめにL寸法を選ぶのが無難である。

5.3. SH波EMATのHalbach磁石配置の磁気特性

磁石配置の工夫による磁束密度の向上が考えられる。Halbach磁石配置はその一つの試みである。

5.3.1. 磁石構造と解析座標系

すでにFig. 3で示したように、Halbach磁石配置は、SH波EMATの一般的な磁石構造の各磁石間に横方向に磁化した磁石を交互に反対向きに挿入することにより構成される。隣接する縦方向に磁化した磁石ペアと横方向に磁化した磁石ペア計4個の磁石はHalbach磁石配置の一周期を構成する。通常、ウイグラーやアンジュレーターの挿入光源用磁気回路は、二つのHalbach磁石配置が対向して設置され、その間の通路に変化磁場を生成させ、電子ビームあるいは陽子ビームなどを既定軌道に沿って走らせる。x方向磁束密度の周期性を保つため、典型的な磁石構造は、整数倍Halbach周期(4個)の磁石個数+縦方向に磁化した磁石1個から構成される^{14,15}。一方、SH波EMATの磁石構造として使用する場合、y方向磁束密度の周期性を保つため、整数倍Halbach周期(4個)の磁石個数+横方向に磁化した磁石1個の合計数量が望ましい。Fig. 3に、8周期のHalbach配置の例を示した。

ここで、Halbach配置はSH波EMATの磁石構造に適することを磁束密度分布特性から示す。

5.3.2. 解析結果と考察

解析条件：磁石材料：サマリウム・コバルト系磁石 R32H(信越化学工業株式会社)

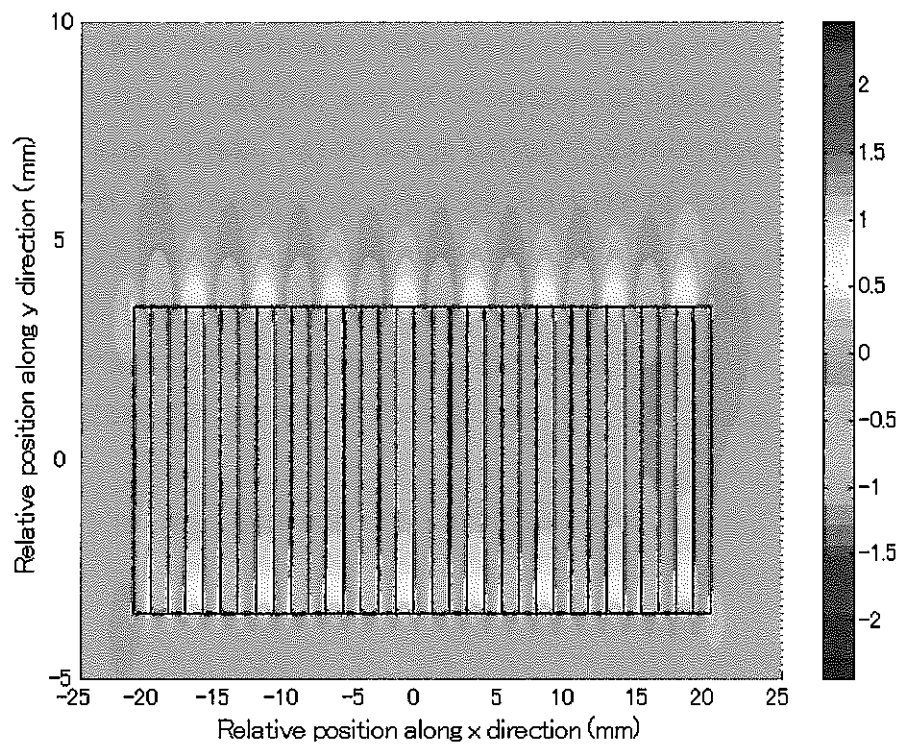
残留磁束密度： $B_r=1.12\text{T}$

磁石寸法：厚み寸法 $a+b=2.5\text{mm}$ 、高さ寸法 $L=5, 7, 10\text{mm}$

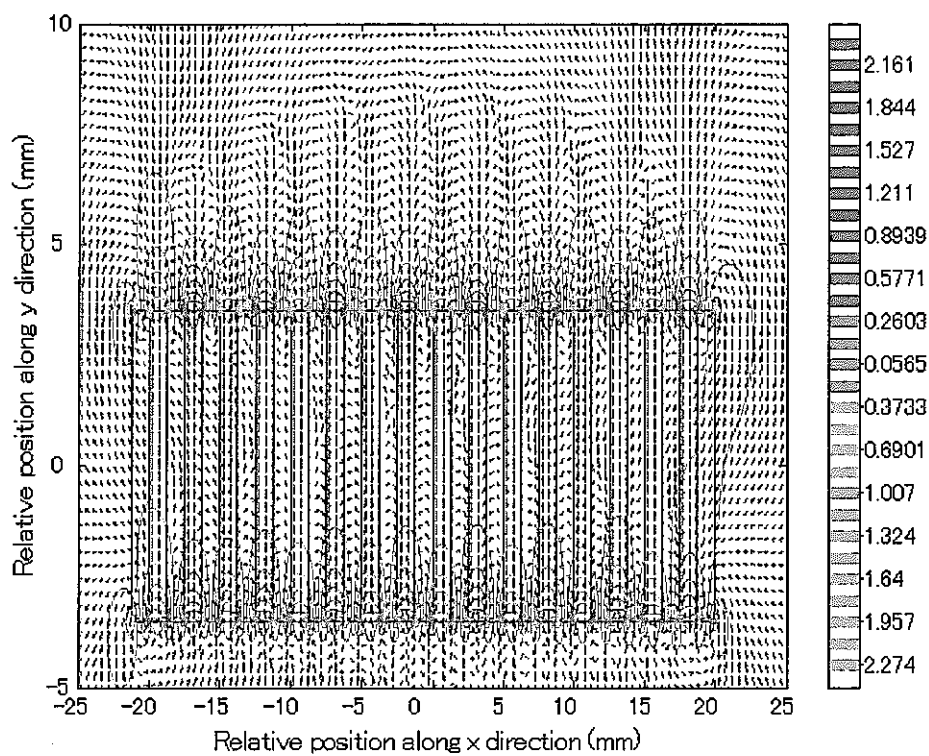
磁石個数：8つのHalbach周期+横方向に磁化した磁石1個：合計33個

①. 固定寸法 : $a=b=1.25\text{mm}$ 、変化寸法 : $L=5, 7, 10\text{mm}$

i. y 方向磁束密度分布、コンター・方向分布 ($L=7\text{mm}$)



(a)



(b)

Fig. 11 Halbach 磁石配置における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. (a) B_y 分布のカラーイメージ, (b) B_y のコンター分布と B の方向性分布特性.

ii. y 方向磁束密度絶対値のリフトオフ距離の依存性と高さ寸法 L の依存性

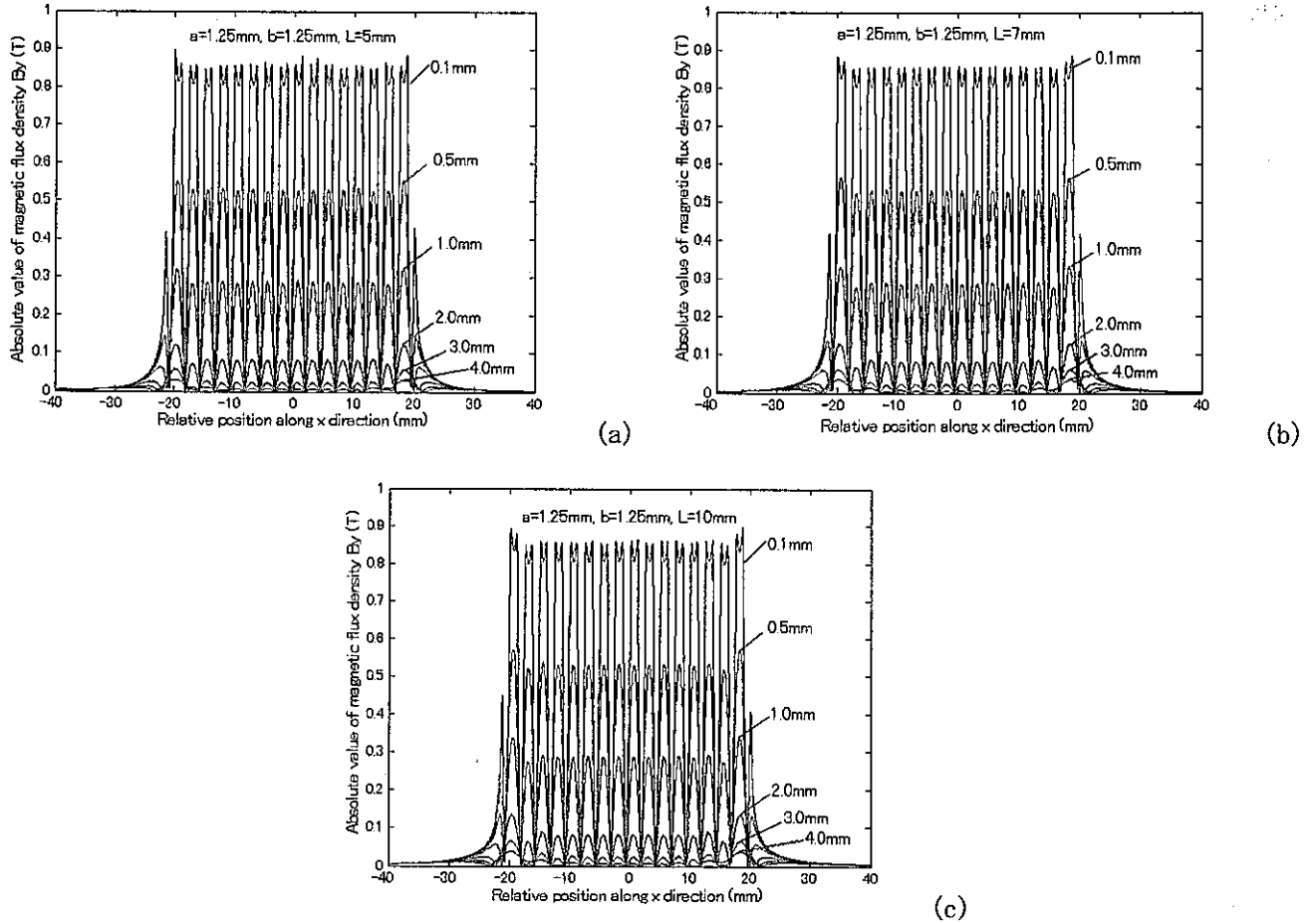


Fig. 12 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=b=1.25\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ (a) 5mm 、(b) 7mm と (c) 10mm である.

iii. $x=0.625\text{mm}$ 断面における y 方向磁束密度の変化特性 (position=0 は磁石表面、position<0 は磁石内部、+y は y 軸の正方向表面における分布、-y は y 軸の負方向表面における分布)

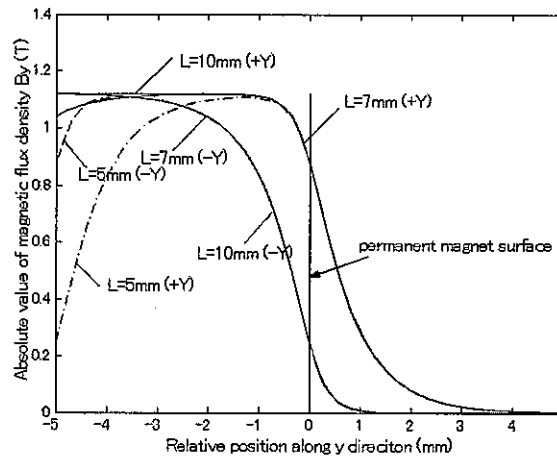


Fig. 13 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=0.625\text{mm}$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の厚み寸法は $a=b=1.25\text{mm}$ 、高さ寸法 L はそれぞれ 5mm 、 7mm 、 10mm である.

Fig. 11(a) に、 $a=b=1.25\text{mm}$ 、 $L=7\text{mm}$ 、8周期 Halbach 磁石配置の y 方向磁束密度 B_y 分布のカラーイメージを示

した。この磁石構造は対称性がないため、構造全体について解析を行なった。Fig. 11(b)に磁束密度 B の方向性分布を示し、縦方向に磁化した各磁石中心付近の磁束密度は、一般的な磁石構造と同じく y 方向に揃っていることが分かった。これはSH波EMATの一般的な磁石構造と同様な磁束密度分布を示しているため、SH波EMATの磁石構造として用いられると考えられる。

Fig. 12に y 方向磁束密度 B_y 分布のリフトオフ距離の依存性を示した。縦方向に磁化した磁石近傍の磁束密度は、磁極表面近く(距離0.1mmの場合)において、一般的な磁石構造より、磁石材料の残留磁束密度(1.12T)との差が大幅に小さくなり、Halbach配置による y 方向磁束密度の向上が明らかである。一方、横方向に磁化した磁石の表面近傍における y 方向磁束密度が低いレベルになっている。Fig. 12の各図を比較すると、高さ L が変化しても、 y 方向磁束密度分布がほぼ変化しないことが分かった。この結果は、Fig. 13に示した $x=0.625\text{mm}$ 断面におけるHalbach磁石配置の y 方向磁束密度分布特性からより明瞭になっている。Fig. 13において、+記号はFig. 3の y 軸の+方向に位置する磁極表面近傍の磁束密度分布に対応し、-記号はFig. 3の y 軸の-方向に位置する磁極表面近傍の磁束密度分布に対応する。高さ L により磁石内部における磁束密度分布が異なっても、磁石表面からの磁束密度が相互に重なり、同じ値になっている。磁束密度 B_y は L (5mm~10mm) に依存しないことを示している。

結果としては、Halbach磁石配置の場合でも、磁化方向寸法 L が重要でないことが分かった。また、Halbach配置において、磁石配置の両面における磁気特性が異なるのが特徴である。ワーキング表面(+記号)近傍の磁束密度の増加はその反対側磁束密度の減少を代価として得られたのである。

iv. まとめ

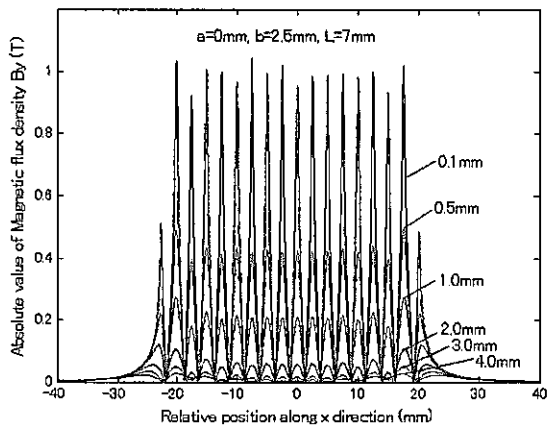
Halbach配置はSH波EMATの磁石構造として使用できる。

Halbach配置において、磁石高さ寸法 L が磁束密度の分布に及ぼす影響が小さい。 y 方向の磁束密度はワーキング表面とその反対表面において非対称分布である。 y 方向における最大磁束密度は、磁石の残留磁束密度の1/2以上が達成でき、後述するようにさらに大きな磁束密度分布も構成可能である。

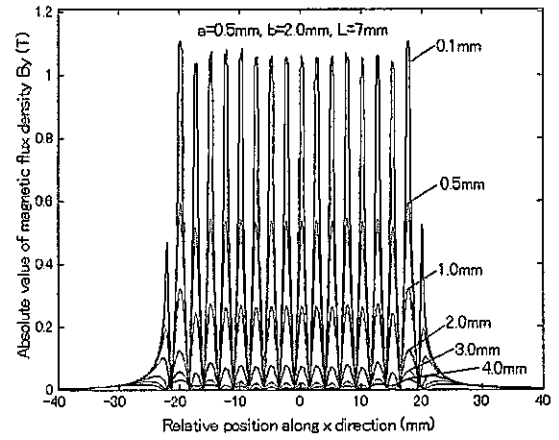
Halbach配置を用いたSH波EMATは一般的な磁石構造より高い磁気特性を持つと予測できる。

②. 固定寸法 : $a+b=2.5\text{mm}$ 及び $L=7\text{mm}$ 、変化寸法 : a 、 b 寸法の組合せ

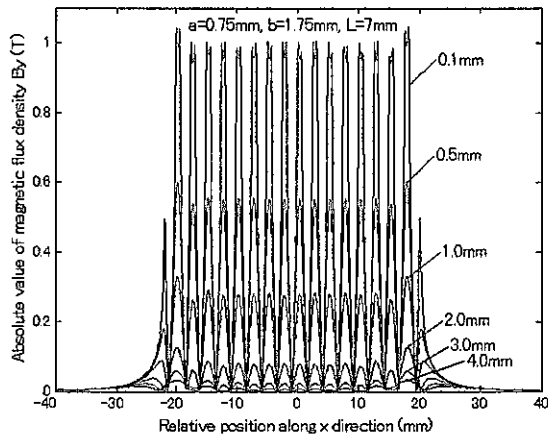
i. y 方向磁束密度の絶対値の分布特性



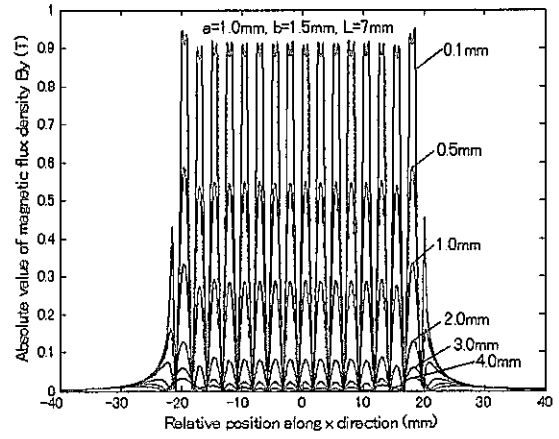
(a)



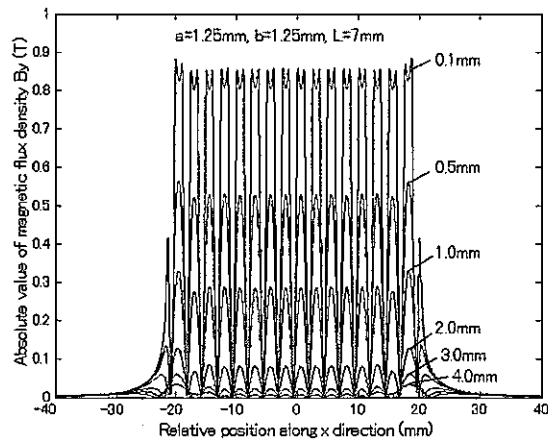
(b)



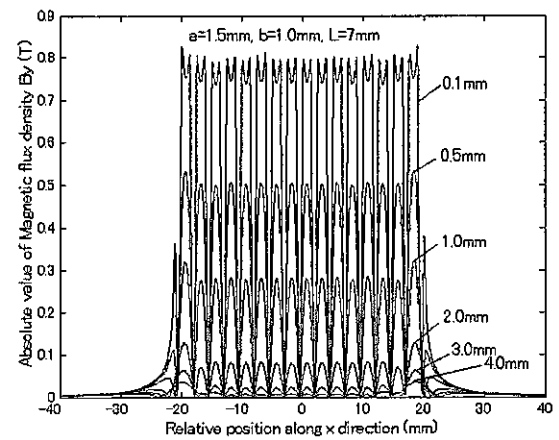
(c)



(d)

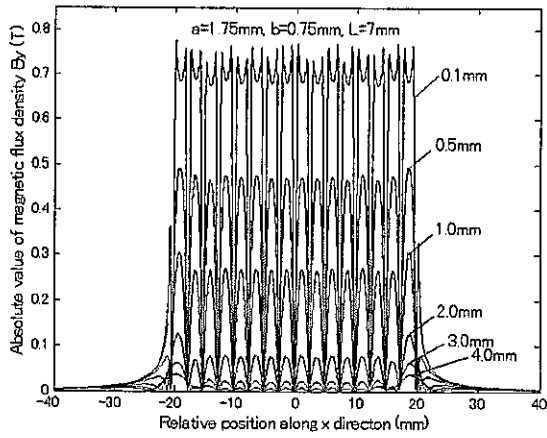


(e)

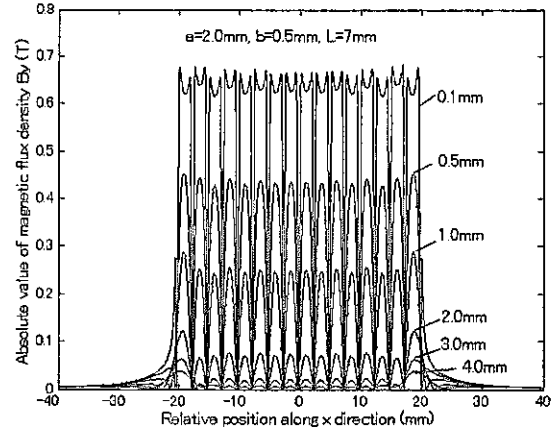


(f)

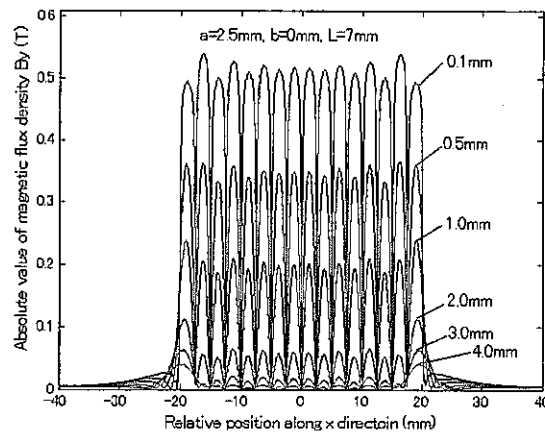
Fig. 14 次のページの説明を参照されたい。



(g)



(h)



(i)

Fig. 14 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm、厚み寸法は $a+b=2.5\text{mm}$ である. (a) から (i) までは異なる a , b 組合せによる磁束密度分布の変化特性である.

ii. $X=a/2$ 断面における y 方向磁束密度変化特性 (position=0 は磁石表面)

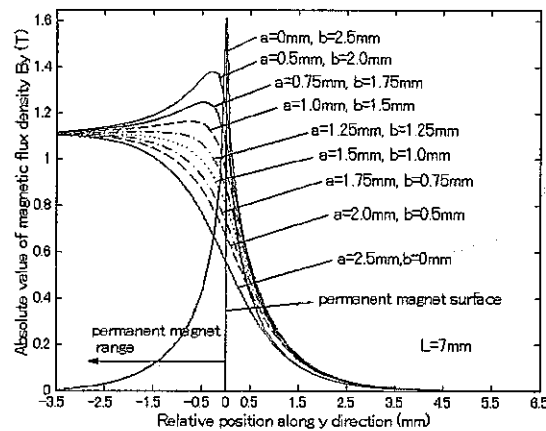


Fig. 15 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=a/2$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm、厚み寸法は $a+b=2.5\text{mm}$ である. 図に示した曲線はそれぞれ a と b の組合せを変化した場合の磁束密度変化特性である.

Fig. 15 の拡大イメージ :

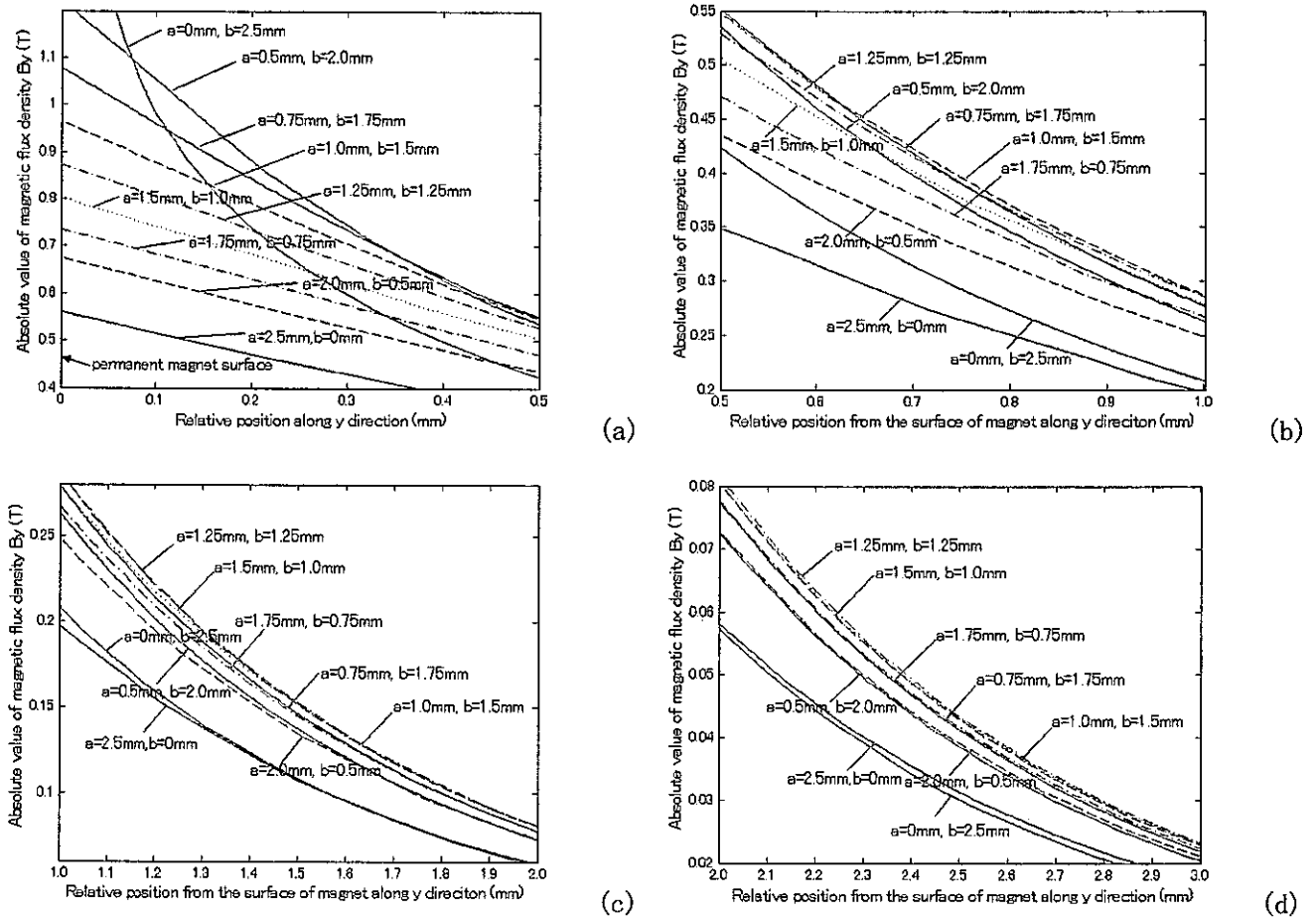


Fig. 16 Fig. 15 の拡大分布.

Fig. 14-Fig. 16は、Halbach磁石配置におけるy方向磁束密度 B_y 分布の磁石厚み寸法 a と b の組合せの依存性である。 a 、 b 組合せの変化に従い、 y方向の磁束密度分布が変化し、 a が大きいほど最大磁束密度が小さくなり、 $a=2.5\text{mm}$ と $b=0\text{mm}$ になると、一般的な磁石構造 (Fig. 14(i)) の磁束密度分布に変わる。 なお、 $a=0\text{mm}$ と $b=2.5\text{mm}$ の極限構造 (横方向に磁化した磁石だけから構成される構造) においても磁束線が閉鎖するため、 y方向の磁束密度分布が構成され、 ワーキング表面で最大値 (Fig. 15) を示し、 リフトオフ距離の増加に従い、 迅速に減少する。 リフトオフ距離が 2mm 以上になると、 一般的な磁石構造の磁束密度よりも小さくなる (Fig. 16(i))。

一方、 Fig. 14(i) から分かるように、 一般的な磁石構造において多数磁石配置により y方向平均磁束密度は、 単体磁石 (Fig. 6(b)) のそれより 10% 程度向上している。 これはすでに説明したように、 x方向磁束密度が隣接する磁石の磁場の拘束により、 y方向に寄与し、 y方向の磁束密度を増大させた。 なお、 Fig. 14(i) と Fig. 9(b) とを比較すると、 リフトオフ距離 0.1mm における最大磁束密度平均値の比 ($0.5/0.42$) は、 両磁石材料の残留磁束密度の比 ($1.12/0.94$) に近い値になっている。

最も大きな特徴として、 Halbach磁石配置において、 磁極表面近傍における磁束密度が大幅に向上することである。 両構造に使われる磁石の量がほぼ同じであるので、 磁石の使用量を増加せず、 Halbach配置のように適切な構造設計により磁気特性が増大できることである。 具体的には、 Halbach配置の場合、 $a+b$ を固定した場合、 解析範囲において、 構造パラメータ a が小さいほど、 y方向の磁束密度が大きい。 ただし、 Fig. 15 に示した断面分布とその拡大イメージの Fig. 16 から分かるように、 ワーキング表面からのリフトオフ距離の増大

につれ、 a 、 b 組合せにより、一部の磁束密度曲線が交差し逆転する。特に $a=0\text{mm}$ 、 $b=2.5\text{mm}$ 組合せの磁束密度の減少速度が一番速い。他の a 、 b 組合せにおいて、Halbach配置の y 方向磁束密度は一般的な磁石構造より上回っている。なお、リフトオフ距離が 1mm 以内で使用する場合、 $a=1.0\text{mm}$ 、 $b=1.5\text{mm}$ 構造のほうが $a=b=1.25\text{mm}$ 構造より磁気特性が優れ、リフトオフ距離が 1mm 以上になると両者はほぼ同レベルになる。注意すべきは、Halbach磁石配置は磁石中心部分の磁束密度が大きな値を示しているが、中心部から両側へ行くにつれ、磁束密度減少が一般的な磁石構造より速く、最終的に一般的な磁石構造(Fig. 14(i))の磁束密度より下回るケースが多く存在する。一方、SH波の超音波強度は励起されたローレンツ力全体の合成効果で表され、磁束密度の総合効果を用い励起超音波強度を評価する必要がある。

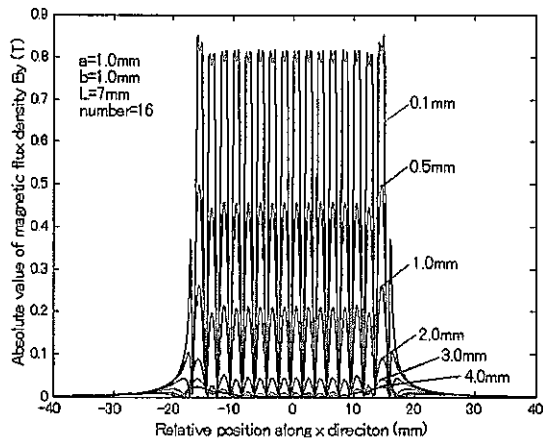
$a=0\text{mm}$ 、 $b=2.5\text{mm}$ の組合せにおいて、短いリフトオフ距離(例えば 0.06mm 以下)で動作する場合、この構成は最大の磁束密度が達成できる。当然、この結果は温度減磁が発生しないのが先決条件である。つまり、磁石の動作点が工作温度の減磁曲線の直線部分に位置する必要がある。また、上記に説明したように励起された超音波の強度は磁束密度全体の総合効果に依存するので、最大磁束密度のみを用いた評価は不十分である。

iii. まとめ

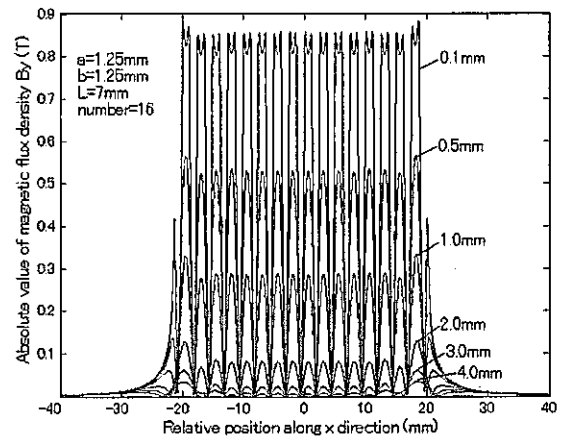
$a+b$ と L を固定した場合、寸法 a 、 b の組合せの変化により、Halbach 配置のワーキング表面における磁束密度分布が変化する。 a が小さいほど、磁石表面近傍の y 方向磁束密度のピーク値が高いが、リフトオフ距離の増加につれ、減少速度が速い場合もあり、リフトオフ距離に対応する最適な a 、 b 組合せの選定が必要である。解析した寸法組合せにおいて、 1.0mm 以内のリフトオフ距離で動作する場合、 $a=1.0\text{mm}$ 、 $b=1.5\text{mm}$ 組合せと $a=b=1.25\text{mm}$ 組合せのほうが最適な磁気性能を発揮できるようである。

③. 固定寸法 : $L=7\text{mm}$ 、変化寸法 : $a=b$ 同時変化

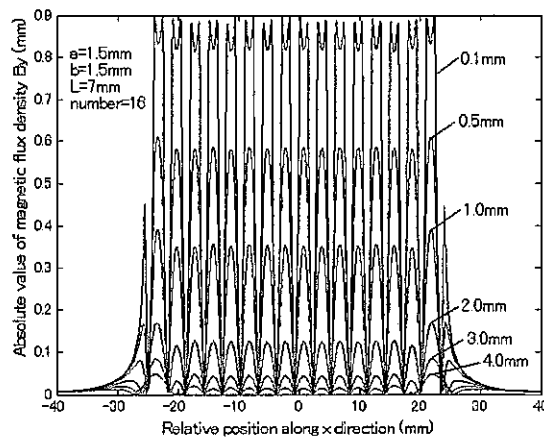
i. y 方向磁束密度の絶対値の分布



(a)



(b)



(c)

Fig. 17 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm 、厚み寸法 $a=b$ はそれぞれ (a) 1.0mm 、(b) 1.25mm and (c) 1.5mm である.

ii. $x=a/2$ 断面における y 方向磁束密度変化特性 (position=0 は磁石表面)

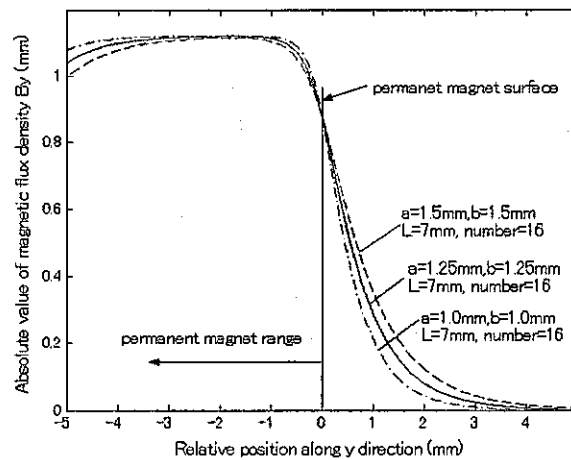


Fig. 18 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=a/2$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 用いた単体磁石の高さ寸法 L は 7mm 、厚み寸法 $a=b$ はそれぞれ 1.0mm 、 1.25mm と 1.5mm である.

Fig. 17は磁石高さ $L=7\text{mm}$ を固定し、厚み寸法 $a=b$ を同時に変化させた場合の y 方向の磁束密度分布のリフトオフ距離の依存性である。 a と b が大きくなるにつれ、同じリフトオフ距離における y 方向の磁束密度が明らかに増大し、EMATのリフトオフによる感度の低下が抑制できる。言い換えれば、縦と横方向に磁化した2種類の単体磁石の厚みが増加することによりEMATの耐リフトオフ特性がよくなる。実際、使用超音波周波数範囲、超音波入射角 θ (Fig. 2を参照)の範囲が超音波探傷手法により制限されるので、磁石厚み寸法の選択範囲も限定される。これは磁石の効率的な利用とEMATの性能向上、及び高探傷検出性の要求を如何にバランスをよく取ることに依存する。結局、解析結果を参照し、数種類の寸法の磁石構造を選択し、実験で性能評価を行ない、最終構造を決めることになる。

iii. まとめ

磁石配置半周期($a+b$)が大きければ EMAT に及ぼすリフトオフの影響が小さくなる。

ただし、磁石配置周期が大きくなると、高周波数の使用が困難になる。実際、周波数を固定した場合、磁石厚みが増加すると、超音波伝播角度 θ が小さくなり、表面と直交する亀裂状欠陥の検出性が悪くなる。つまり、バランスを取れた $a+b$ 値の選択が重要である。

④. Halbach 配置+ヨーク構造における磁気特性

i. 磁石構造

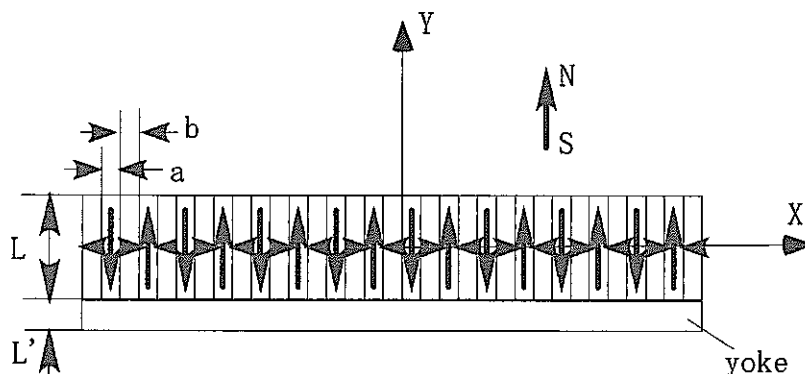


Fig. 19 ヨークを用いた Halbach 磁石配置.

ただし、 a 、 b はそれぞれ縦方向と横方向に磁化した単体磁石の厚み、 L は単体磁石の高さ、 L' はヨーク材の高さである。

ii. y 方向磁束密度の絶対値の分布 ($a=b=1.25\text{mm}$ 、 $L=5\text{mm}$ 、 $L'=2\text{mm}$)

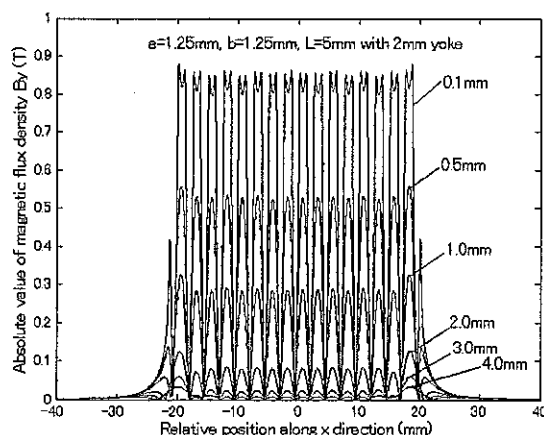


Fig. 20 ヨークを用いた Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性.

iii. $x=0.625\text{mm}$ 断面における y 方向磁束密度変化特性 (position=0 は磁極表面)

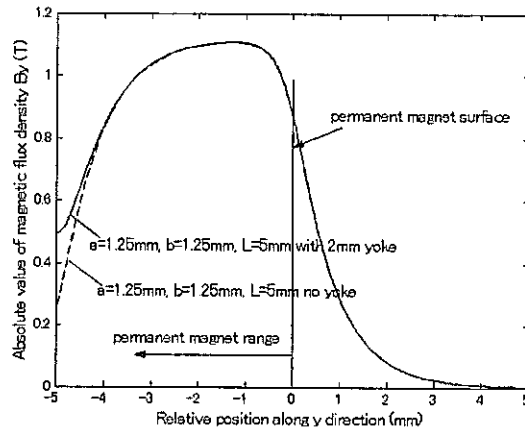


Fig. 21 Halbach 磁石配置のセントラル断面 ($x=a/2$) における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性。比較する構造はそれぞれ Halbach 磁石配置とヨークを用いた Halbach 磁石配置、使用する単体磁石の高さ寸法 L は 5mm 、厚み寸法は $a=b=1.25\text{mm}$ である。

ヨーク構造は、永久磁石の磁場を分散させず、磁気性能を集中的に発揮できるため、たくさんの磁石構造に使用されている。Halbach 磁石配置にヨークを取り入れる場合の y 方向磁束密度のリフトオフ距離依存性は、Fig. 20 に示した。しかし、結果は同じ磁石高さを持つ Halbach 配置 (Fig. 12(a)) の y 方向磁束密度分布とほぼ同様 (Fig. 21) であり、ヨーク材による磁束密度の向上が見られなかった。この理由は、やはり Fig. 13 に示したように、Halbach 配置における y 方向磁束密度に及ぼす磁石高さの影響が小さいからである。これは多数磁石の配置による y 方向磁束密度の向上がヨーク材の影響を低下したと考えられる。

なお、ここで示していないが、一般的な磁石構造においてもヨーク導入による磁気特性の向上が現れなかった。

iv. まとめ

ヨークによる Halbach 配置の y 方向磁束密度分布への変化が小さい。同じ磁極構造を持つ櫛状磁石 (Fig. 22) は製作上加工性が高い代わりに、寸法が小さい場合、着磁が難しくばらつきが大きい可能性が考えられ、構造として使用するメリットが大きくないが、研究上今までにない構造であるので、試みる価値がある。

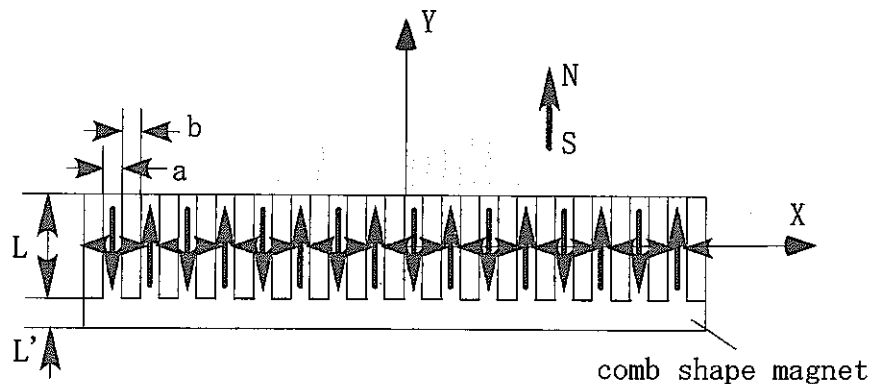


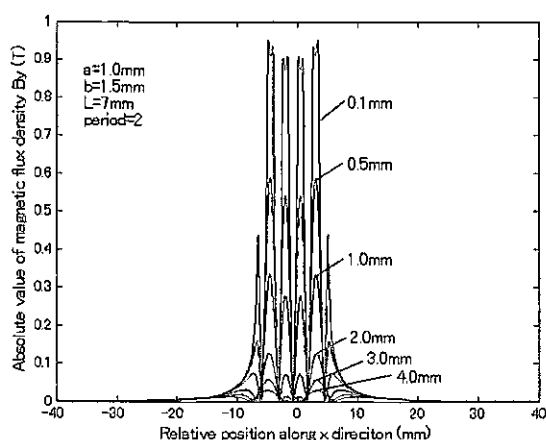
Fig. 22 櫛形状磁石を用いた Halbach 磁石配置。

⑤. 磁石個数による y 方向磁束密度分布の変化

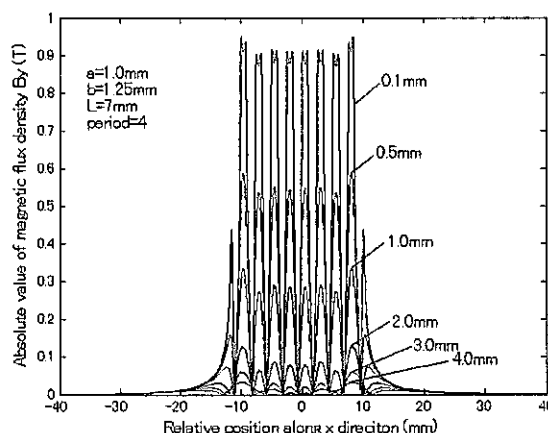
i. y 方向磁束密度の絶対値の分布 ($a=1.0\text{mm}$ 、 $b=1.5\text{mm}$ 、 $L=7\text{mm}$ 、磁石周期数：2、4、6、7.5、8)

Fig. 23 と Fig. 24 に、磁石数量の変化による y 方向磁束密度分布の変化を示した。Halbach 配置の 2 周期で構成した配置を除き、Fig. 24 に示したように、磁石個数の変化は y 方向磁束密度分布に及ぼす影響がほ

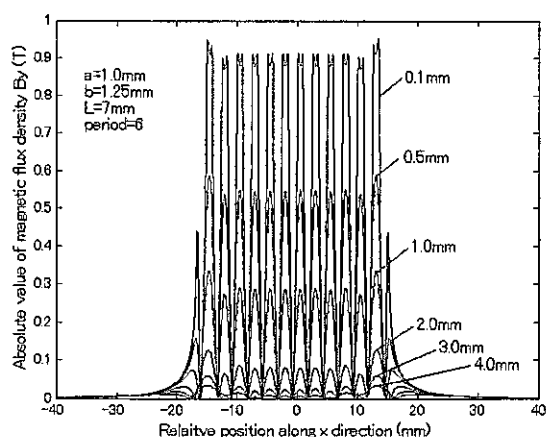
ばないと考えられる。つまり、磁石個数がある程度(磁石配置周期数 >2)があれば、多数磁石の相互影響により、磁石中心部における y 方向磁束密度の最大値がほぼ同様であり、リフトオフ距離の依存性も一定となる。



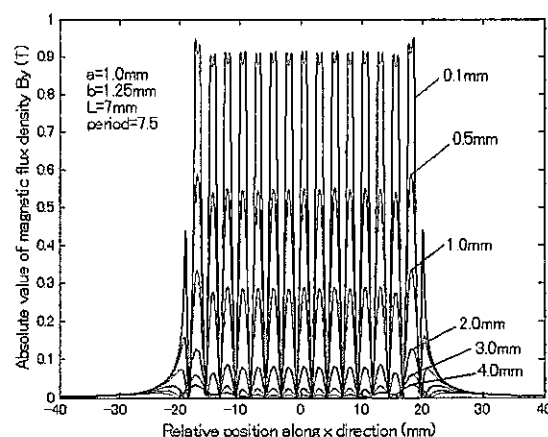
(a)



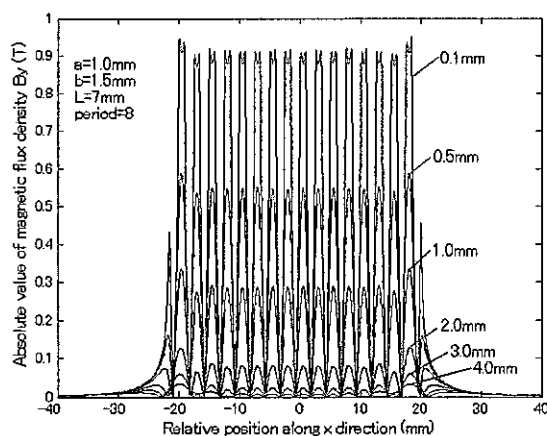
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 23 Halbach 磁石配置の異なるリフトオフ距離の断面における y 方向磁束密度 B_y の分布特性。用いた単体磁石の高さ寸法は $L=7\text{mm}$ 、厚み寸法は $a=1.0\text{mm}$ と $b=1.5\text{mm}$ 、磁石配置周期数はそれぞれ(a) 2, (b) 4, (c) 6, (d) 7.5 と (e) 8 である。

ii. $X=0.5\text{mm}$ 断面における y 方向磁束密度変化特性(position=0 は磁極表面)

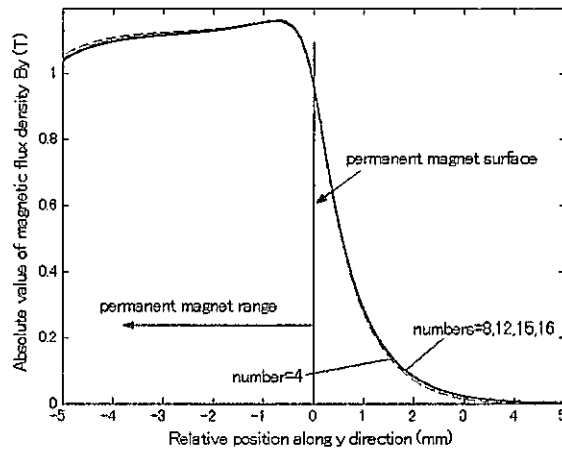


Fig. 24 Halbach 磁石配置のセントラル断面($x=0.5\text{mm}$)における y 方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離の依存性. 比較する構造は Halbach 磁石配置で、用いた単体磁石の高さ寸法は $L=7\text{mm}$ 、厚み寸法は $a=1.0\text{mm}$ と $b=1.5\text{mm}$ 、使用する磁石配置周期数はそれぞれ 2、4、6、7.5 と 8 である。

iii. まとめ

磁石構造に用いられる磁石の総数量は、 y 方向磁束密度分布のリフトオフ距離の依存性に及ぼす影響が小さい。ただし、最低限の磁石個数(2周期の磁石配列)を満足する必要がある。

注意すべきは、磁石個数が増加すると全体的に渦電流励起範囲も増大するので、超音波音源が強くなり、指向性もよくなる。従って、磁石個数は EMAT 構造構成上では重要なパラメータとされる。なお、数量増加のデメリットは EMAT 全体重量の増加と近距離音場範囲の増大と考えられる。

5.4. 磁石構造常温特性総括

- ①. 単体磁石の場合、磁石高さ寸法の増加につれ、 y 方向磁束密度が増大し、磁気特性が強くなる。
- ②. SH 波 EMAT の一般的な磁石構造において、 y 方向に磁化した多数磁石の x 方向並行配置により、全体的に、 y 方向の磁束密度が大きくなり、磁極表面近傍で単体磁石より 10%程度の y 方向磁束密度が向上する。これは、隣接単体磁石磁場の相互影響により、 x 方向磁束線の発散が拘束され、対応部分が y 方向に寄与した結果である。なお、磁極表面近傍における y 方向磁束密度のピーク値は近似的に磁石材料の残留磁束密度に比例する。
- ③. Halbach 磁石配置は一般的な磁石構造より強力な y 方向磁束密度分布を構成できる。これは磁石体積一定の条件で、磁石構造を適切化した結果である。同じ半周期長さ(2.5mm)の一般的な磁石構造($a=2.5\text{mm}$)に対して、Halbach 配置($a=b=1.25\text{mm}$)の場合、 y 方向最大磁束密度が 1.6 倍程度向上できる。
- ④. 一般的な磁石構造及び Halbach 磁石配置において、磁石高さ方向寸法 L は重要ではない。厚み 2.5mm 程度の磁石の場合、その高さが 5mm あれば、構造全体の y 方向磁束密度が高さ 10mm 以上の構造と同様な磁束密度分布特性を持つ。ただし、製作プロセスによるばらつきを考慮すると、7mm 高さの構造が性能的に安定である可能性が大きい。
- ⑤. 多数磁石配置の磁石構造において、2 周期以上配置があれば、 y 方向磁束密度ピーク分布に及ぼす配置周期数の影響が小さい。
- ⑥. 総合的に、半周期 2.5mm の磁石を用いて SH 波 EMAT の磁石構造を構成する場合、Halbach 磁石配置が強い y 方向磁束密度が構成できる。なお、磁石の高さが 5mm であれば十分であるが、製作上のばらつきを考慮する場合、7mm なら安定した磁石構成ができる。パラメータ a と b は、 $a=b=1.25\text{mm}$ と $a=1.0\text{mm}$ 、 $b=1.5\text{mm}$

の組合せが宜しい。参照として、 $a=1.5\text{mm}$ 、 $b=1.0\text{mm}$ の構造も考えられる。

6. まとめ

Halbach 磁石配置は、SH 波 EMAT の磁石構造として使用可能である。

Halbach 磁石配置は、一般的な磁石構造より強力な磁気特性を有する。配置半周期 2.5mm 、縦と横方向に磁化した磁石の厚み寸法 $a=b=1.25\text{mm}$ の Halbach 配置における y 方向磁束密度の最大値は一般的な磁石構造の 1.6 倍にも達成する。即ち、ほぼ同じ磁石の量で強力な SH 波 EMAT が構成できる。

SH 波 EMAT の磁石構造において、 y 方向磁束密度は磁石高さ寸法 h への依存性が小さい。これは、隣接し合う磁石磁場の相互影響によると考えられる。配置半周期 2.5mm の場合、高さ寸法 5mm があれば、磁石配置構造ではほぼ一定で安定な磁気特性が得られるが、磁石製作時のばらつきを考慮すると高さ 7mm の磁石で宜しい。これは、磁石の重量軽減による EMAT の軽量化にとって重要な意義を持つ。

磁石構造の配置半周期が大きければ、構造全体の耐リフトオフ特性も強くなるが、SH 波 EMAT の磁石構造とする場合、低周波数での使用が適することになるので、適切な配置半周期と耐リフトオフ特性のバランスの取れた設計が重要である。

一方、EMAT の高温環境の使用において、不可逆温度減磁により磁石の磁気特性が低下する可能性があるため、別途高温用 EMAT の磁石構造設計が必要である。特に横方向に磁化した磁石が配置される Halbach 配置は、高温構造設計と適切な磁石グレード選択が EMAT 設計上重要、不可欠である。

高温磁石構造の設計については別の研究報告で論ずる。

7. 参考文献

1. 仲村 喬, 林道 寛, 荒 邦章, 神村 武男, 都築 鋭, 森本 一夫, 永岡 悦雄, 池田 直昭, “「もんじゅ」ISI システムの基本構想と展開”, 三菱重工技報, Vol. 23, No. 6, 65-70, 1986.
2. K. Hogberg, “Ultrasonic Testing Using the EMAT Technique—Electro Magnetic Acoustic Transducer”, Materials and Design, Vol. 14, No. 4, pp. 251-252, 1993.
3. H. J. Saltzburger, G. Hubschen and M. Kroning, “Electromagnetic Ultrasonic (EMUS) Probes: State of the Art and Developments for Application in Nuclear Power Plants”, Proceedings of the 12th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 137-142, 1993.
4. B. W. Maxfield and C. M. Fortunko, “The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs)”, Materials Evaluation, Vol. 41, pp. 1399-1408, 1983.
5. 北原 弘道, 笹島 洋幸, 森本 一夫, “電磁超音波を用いた検査装置(EMAT)”, 高压ガス, Vol. 33, No. 8, 30-35, 1996.
6. 須山 昇司, 森本 一夫, “電磁超音波(EMAT)を用いた広域部の探傷”, 非破壊検査, Vol. 46, No. 5, 320-325, 1997.
7. K. Sawaragi, H. I. Salzburger, G. Hubschen, K. Enami, A. Kirihigashi and N. Tachibana, “Improvement of SH-wave EMAT phased array inspection by new eight segment probes”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 198, pp. 153-163, 2000.
8. Y. Kurozumi, M. Higashi, T. Satou and M. Nishikawa, “Performance Characteristics of Electromagnetic Generation and Detection of Shear Horizontal Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers”, Materials Evaluation, Vol. 59, No. 5, p. 638-644, 2001,
9. H. Rindo, N. Mitabe, K. Ara, K. Nagai and M. Otaka, “Research and Development on In-Service Inspection System for Reactor Vessel of FBRs”, ASME, ICONE-2(Second International Conference on Nuclear Engineering, San Francisco, California, U. S. A. 1993. 3.
10. C. F. Vasile and R. B. Thompson, “Excitation of Horizontally Polarized Elastic Waves by Electromagnetic Transducers with Periodic Magnets”, Journal of Applied Physics, Vol. 50, p. 2583-, 1979.
11. C. M. Fortunko, “Ultrasonic Detection and Sizing of Two-Dimensional Defects as Long wavelengths”, Applied Physics Letters, Vol. 38, p. 980-, 1981.
12. C. M. Fortunko and J. C. Moulder, “Ultrasonic Inspection of Stainless Steel Butt Welds Using Horizontally Polarized Shear Waves”, Ultrasonics, May, p. 113-, 1982.
13. K. Halbach, J. Chin, E. Hoyer, H. Winick, R. Cronin, J. Yang and Y. Zambre, “A permanent magnet undulator for Spear”, IEEE transactions on Nuclear Science, Vol. 28, p. 3136-3138, 1981.
14. K. Halbach, “Physical and Optical Properties of Rare Earth Cobalt Magnets”, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 187, p. 109-117, 1981.
15. H. Winick and J. E. Spencer, “Wiggler Magnets at SSRL—Present Experience and Future Plans”, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 172, p. 45-53, 1980.